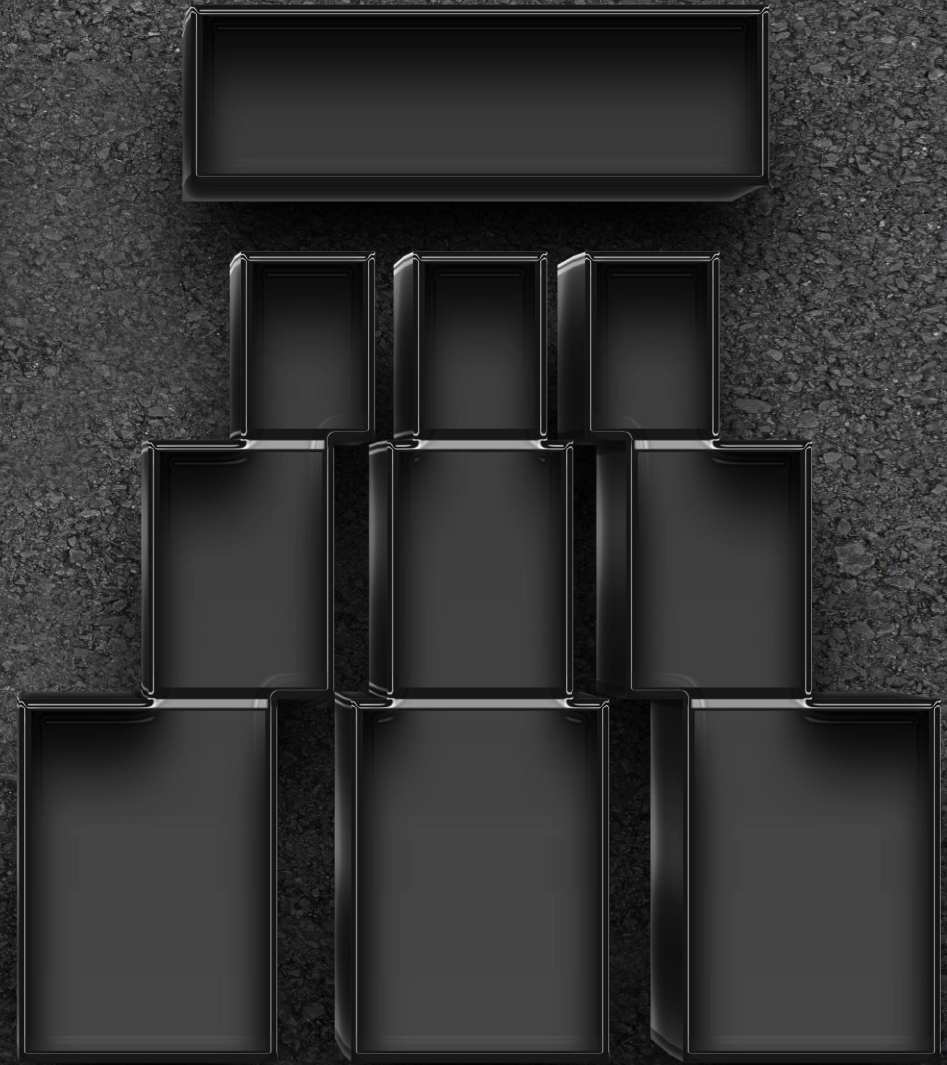




XIII Congreso Mexicano del Asfalto. 20, 21y 22 de agosto de 2025, Cancún, Quintana Roo, México

Consideraciones y adecuaciones para el diseño de mezclas asfálticas con material reciclado RAP

Dr. Horacio Delgado Alamilla



Comunicaciones

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes



XIII Congreso Mexicano del Asfalto. 20, 21y 22 de agosto de 2025, Cancún, Quintana Roo, México



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

@AMAACmx

<http://www.amaac.org.mx>



CONTENIDOS



01

Reciclado de Pavimentos Asfálticos

02

Características de cumplimiento de una mezcla asfáltica

03

Consideraciones en el diseño de mezclas asfálticas con RAP

04

Procedimiento de diseño en función de la concentración de RAP

05

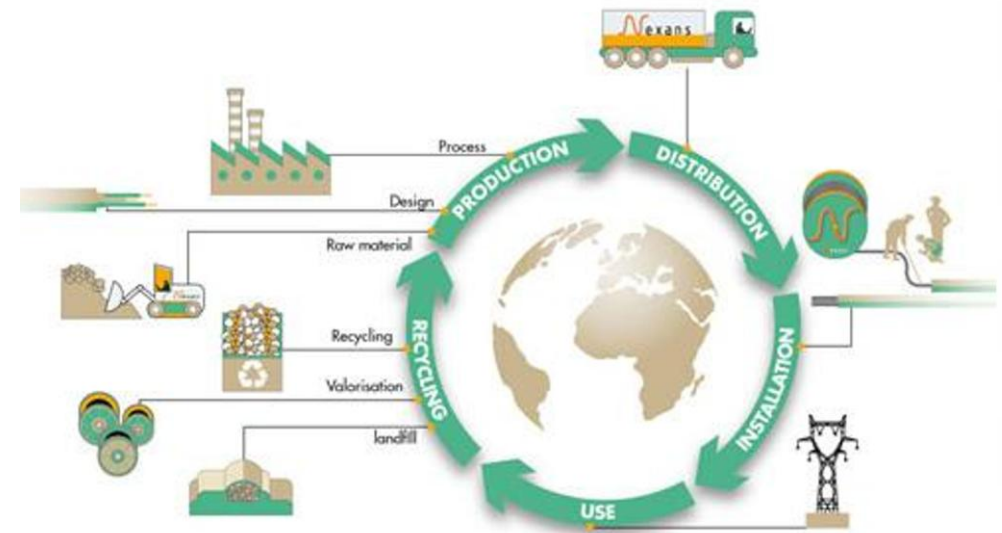
Adecuaciones a requeridas para la implementación en México



Reciclado de pavimentos Asfálticos

El reciclaje de pavimentos asfálticos es el proceso de reutilización de materiales existentes de las carreteras para crear nuevas capas de asfalto.

- Sostenibilidad Ambiental
- Eficiencia Económica
- Conservación de Energía
- Mejora de la Infraestructura

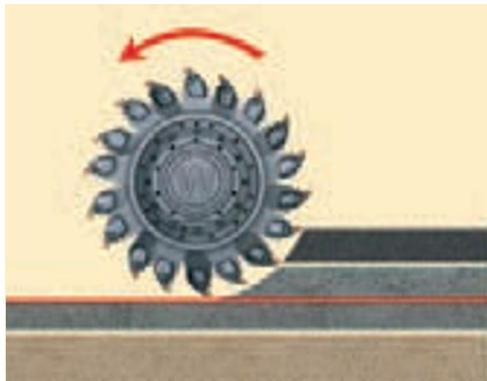


Material Recuperado del pavimento Asfáltico



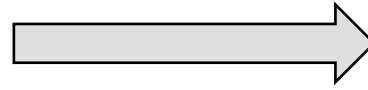
El fresado en frío surgió a principio de los años 80, significando la reducción de energía, tiempo y costos.

- Los nuevos materiales desarrollados en las herramientas de corte permiten fresar sin calentamiento previo
- Se desarrolla un sistema de extracción que mejoraba la logística en obra
- Se incorporaron grandes depósitos de agua para refrigerar las herramientas

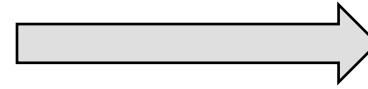


Técnicas de reciclado de pavimentos

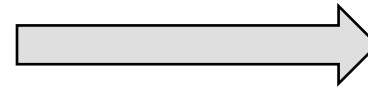
Reciclado en caliente en sitio



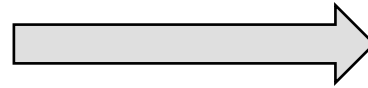
Reciclado en frío en sitio



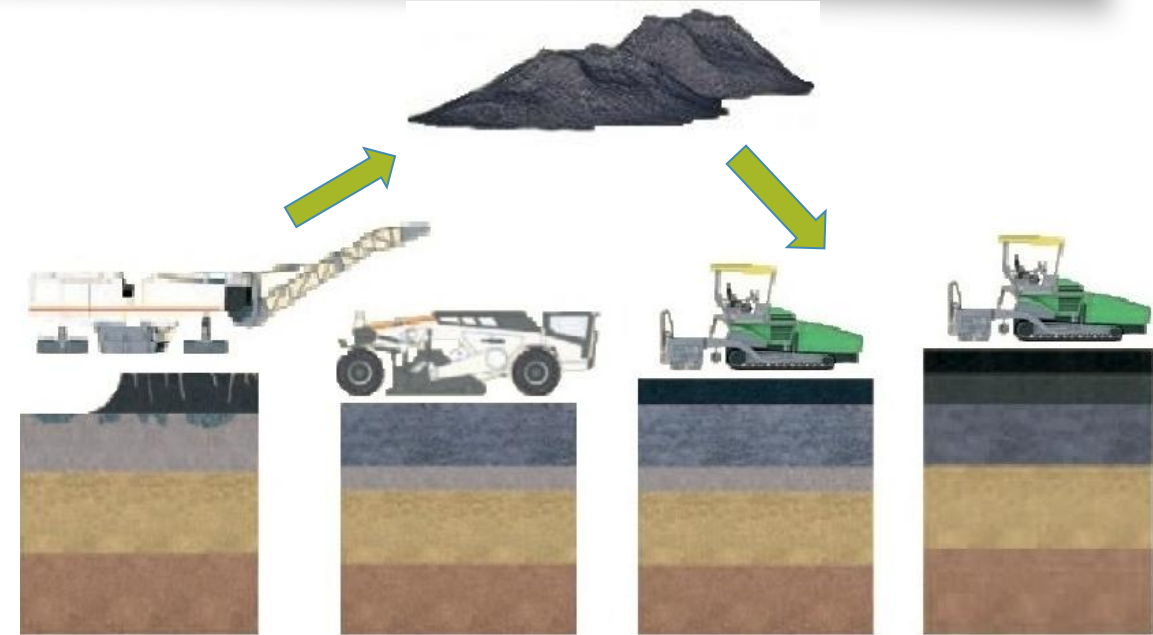
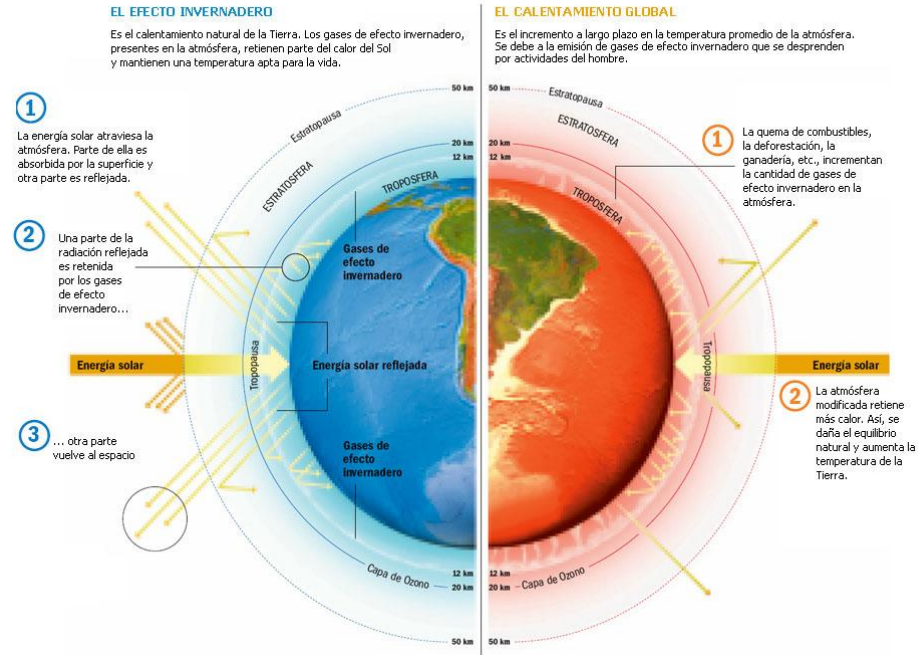
Reciclado en caliente en planta



Reciclado en frío en planta



Aportes medioambientales y de procesos constructivos



- Reúso y conservación de recursos naturales no renovables
- Aporte económico del RAP
- Reducción de consumo de energía y emisiones de GEI

- Periodos de construcción más cortos
- Conservación del diseño geométrico y distancias de visibilidad
- Se pueden modificar las capas inferiores (Recuperación total).

CONTENIDOS



01

Reciclado de Pavimentos Asfálticos

02

Características de cumplimiento de una mezcla asfáltica

03

Consideraciones en el diseño de mezclas asfálticas con RAP

04

Procedimiento de diseño en función de la concentración de RAP

05

Adecuaciones a requeridas para la implementación en México



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

@AMAACmx

<http://www.amaac.org.mx>



Descripción general de una Mezcla asfáltica

Combinación homogénea de material pétreo y asfáltico, eventualmente aditivos.

Material pétreo

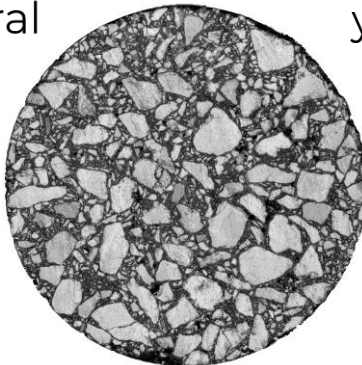


Capacidad estructural

Material asfáltico



Ligante: adhesión y cohesión

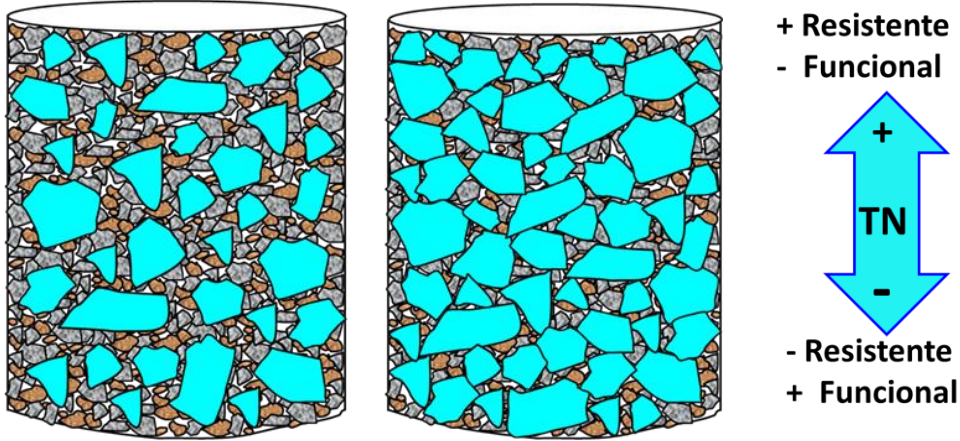


Comportamiento mecánico general

- ▣ Viscoelasticidad y sensibilidad térmica,
- ▣ Sensibilidad a la velocidad de deformación,
- ▣ Sensible al tiempo de aplicación,
- ▣ Envejecimiento.

Clasificación de las Mezclas Asfálticas

Granulometría



Materiales de aporte No convencionales

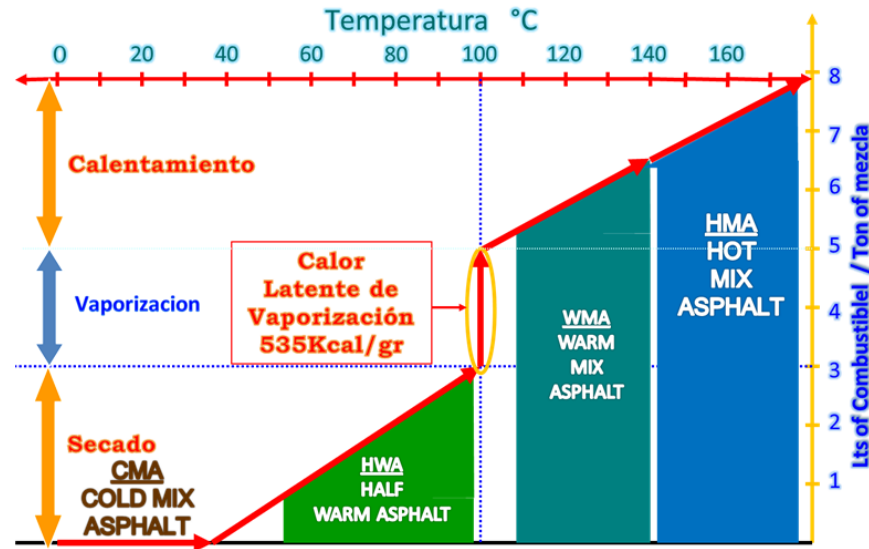
Hule de llanta



RAP



Tipo de asfalto



Base estándar de diseño

Materiales sustituyen una fracción

Cambia el mecanismo de falla



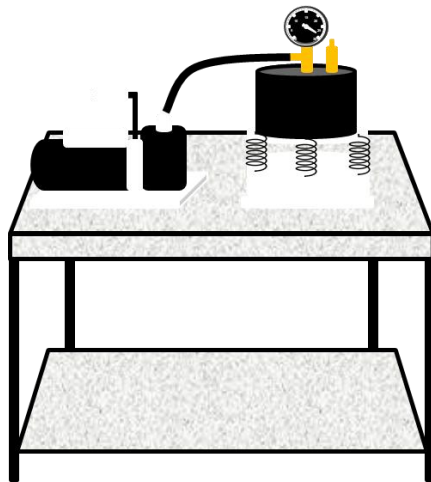
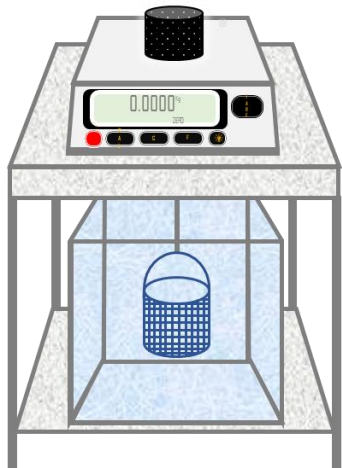
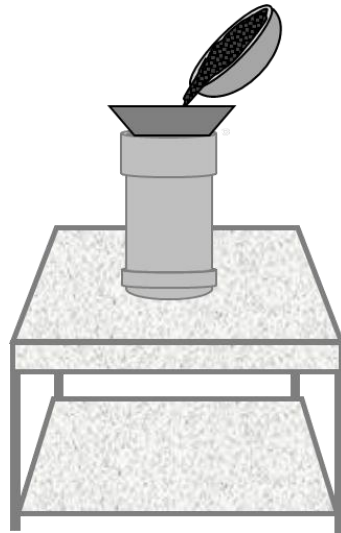
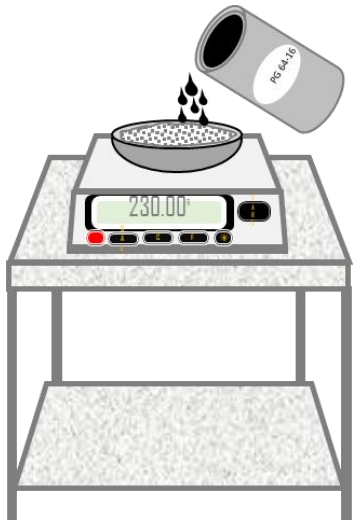
Asociación Mexicana
del Asfalto, A.C.

@AMAACmx

<http://www.amaac.org.mx>



Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas



Ensayo	Especificación
Número de giros iniciales en cada probeta	8
Número de giros de diseño en cada probeta	100
Grado de compactación al número de giros iniciales ($GC@N_{ini}$)	$\leq 89 \%$
Grado de compactación al número de giros máximos ($GC@N_{max}$)	$\leq 98 \%$
Vacíos de aire (V_a) a los giros de diseño	4 %
Vacíos en el Agregado Mineral (VAM)	12-15%
Vacíos llenos de asfalto (VFA) %	65 - 75 %
Relación Filler-asfalto (R_{F-Pbe}) ^[1]	0.6 - 1.2



Criterios de desempeño de la mezcla asfáltica

Ensayo	Especificación
Susceptibilidad al daño inducido por humedad por medio de la Relación en la Resistencia a la Tensión Indirecta (TSR), %, mínimo	80
Susceptibilidad a la formación de roderas y daño por humedad mediante la Rueda Cargada de Hamburgo a 50° C y 20 000 pasadas, mm, máximo	10
Módulo Dinámico, $ E^* $ 20° C, 10Hz, MPa, mínimo	5 000
Resistencia a la fatiga, Viga a Flexión en cuatro puntos, 20° C, $f=10\text{Hz}$, No. Ciclos	
Repeticiones mínimas a la falla ^[2] a 400 $\mu\epsilon$, N_f , mínimo	$1,0 \times 10^6$
Repeticiones mínimas a la falla ^[2] a 500 $\mu\epsilon$, N_f , mínimo	$1,0 \times 10^5$
Repeticiones mínimas a la falla ^[2] a 600 $\mu\epsilon$, N_f , mínimo	$1,0 \times 10^4$
Nota. El criterio de falla considerado es la pérdida del 50% de la rigidez inicial.	

Solicitaciones y Degradaciones en un Pavimento Asfáltico



Baches



Roderas



Fatiga



CONTENIDOS



01

Reciclado de Pavimentos Asfálticos

02

Características de cumplimiento de una mezcla asfáltica

03

Consideraciones en el diseño de mezclas asfálticas con RAP

04

Procedimiento de diseño en función de la concentración de RAP

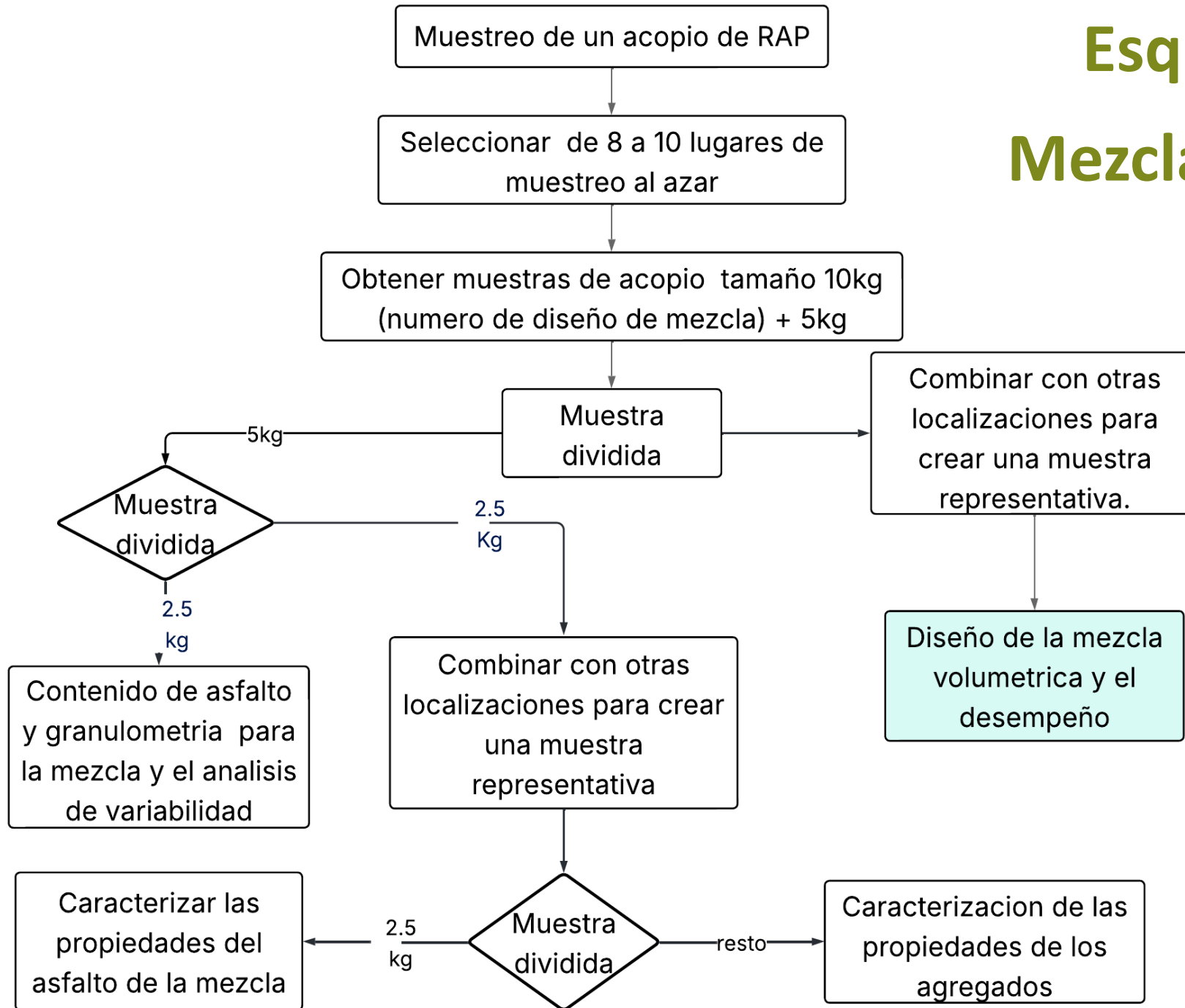
05

Adecuaciones a requeridas para la implementación en México



Esquema de diseño

Mezclas Asfálticas con RAP

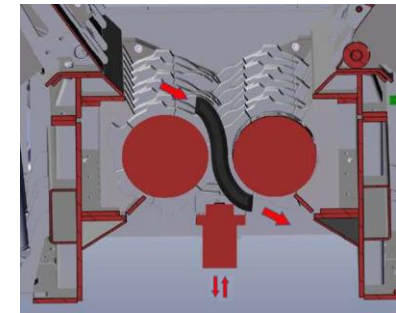
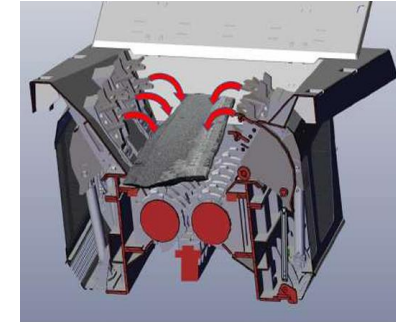
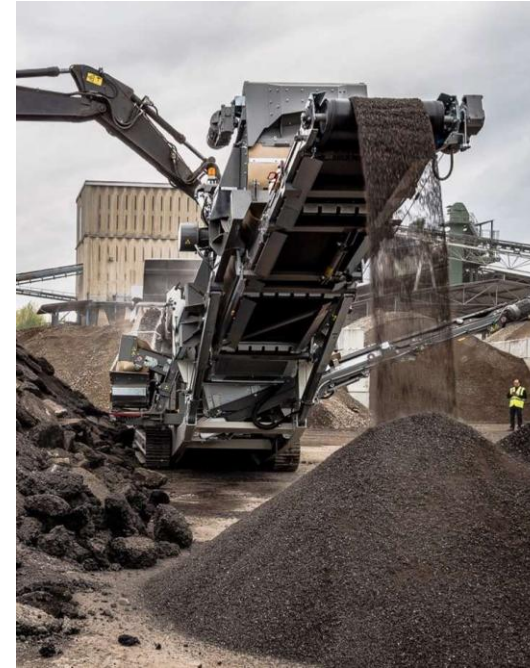


Consideraciones y tratamiento del Fresado



Consideraciones:

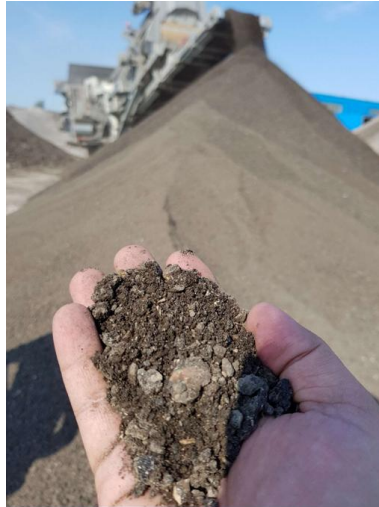
- Tipo de Tambor
- Velocidad de ejecución
- Herramienta de corte
- Condición del sitio y proyecto



Consideraciones:

- Utilizar 1 o 2 fracciones
- Definir TN del RAP procesado
- Cribar por malla seleccionada
- Disgregar sobretamaños

Almacenamiento del RAP



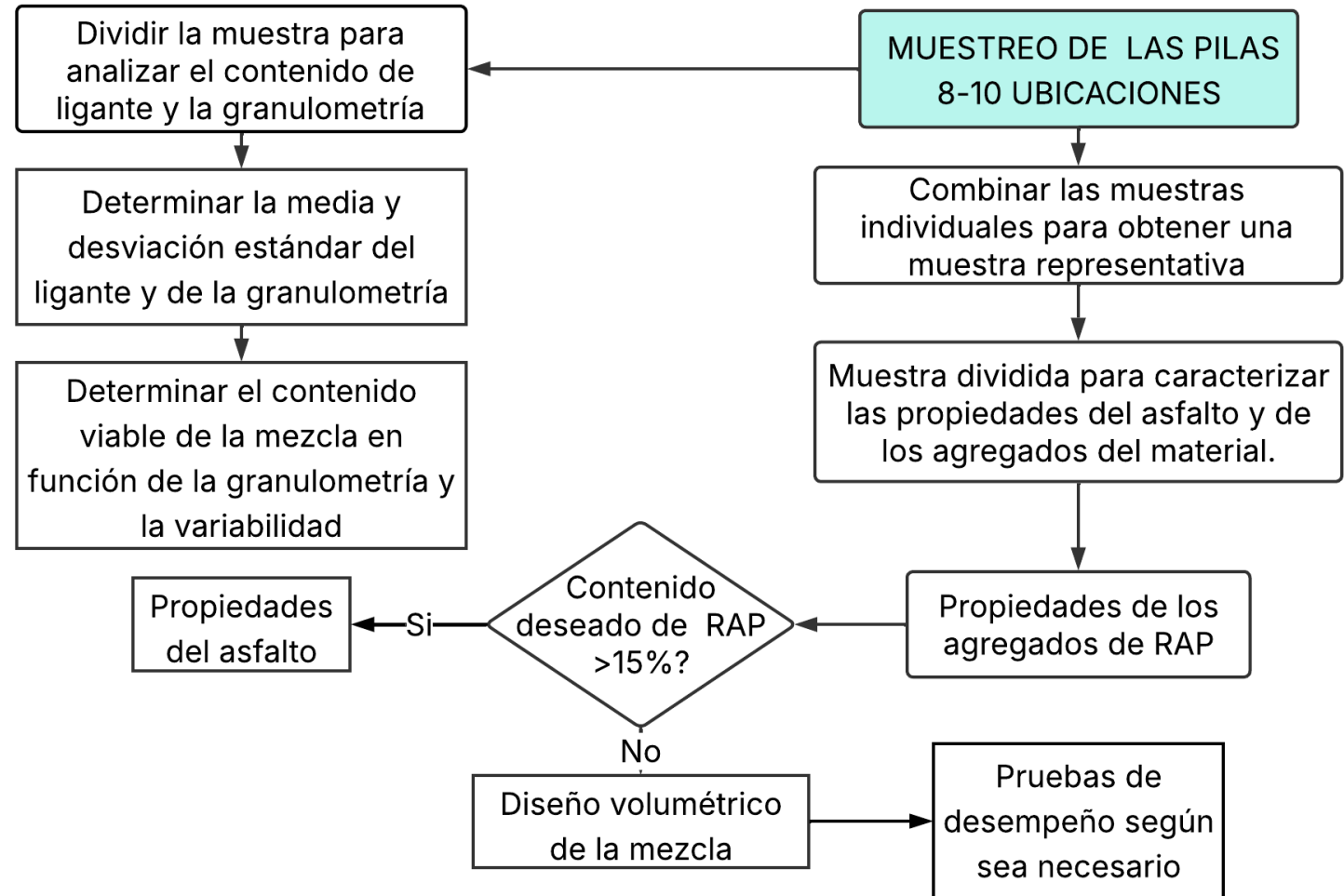
¿Que debo considerar?

1. Un inventario del RAP disponible y del RAP que se puede obtener al año,
2. Un resumen del tipo de mezclas que se producirán en el proyecto,
3. La determinación de la cantidad máxima de RAP que se puede utilizar en las mezclas asfálticas a utilizar en el proyecto,
4. Una comparación de la cantidad de RAP disponible con la cantidad de RAP necesaria.

Preguntas Generales

- ¿Almacenamiento único o múltiple de RAP?
- ¿Reposición de RAP?
- ¿Cómo minimizar la humedad?

Muestreo del RAP



Contenido de asfalto – Recuperación del asfalto



Fracciones de RAP para el diseño

Preguntas de base

¿Cuántas fracciones debo utilizar?

Concentraciones Bajas - Una fracción

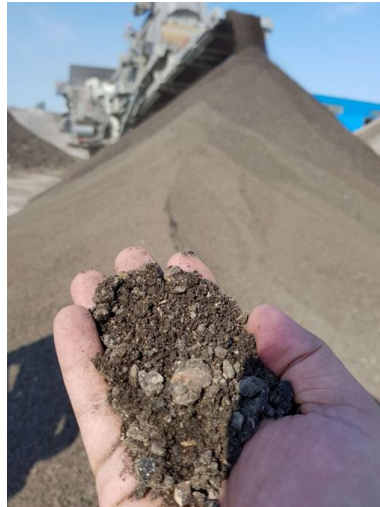
Concentraciones Intermedia - dos fracciones

Concentraciones altas - dos o más fracciones

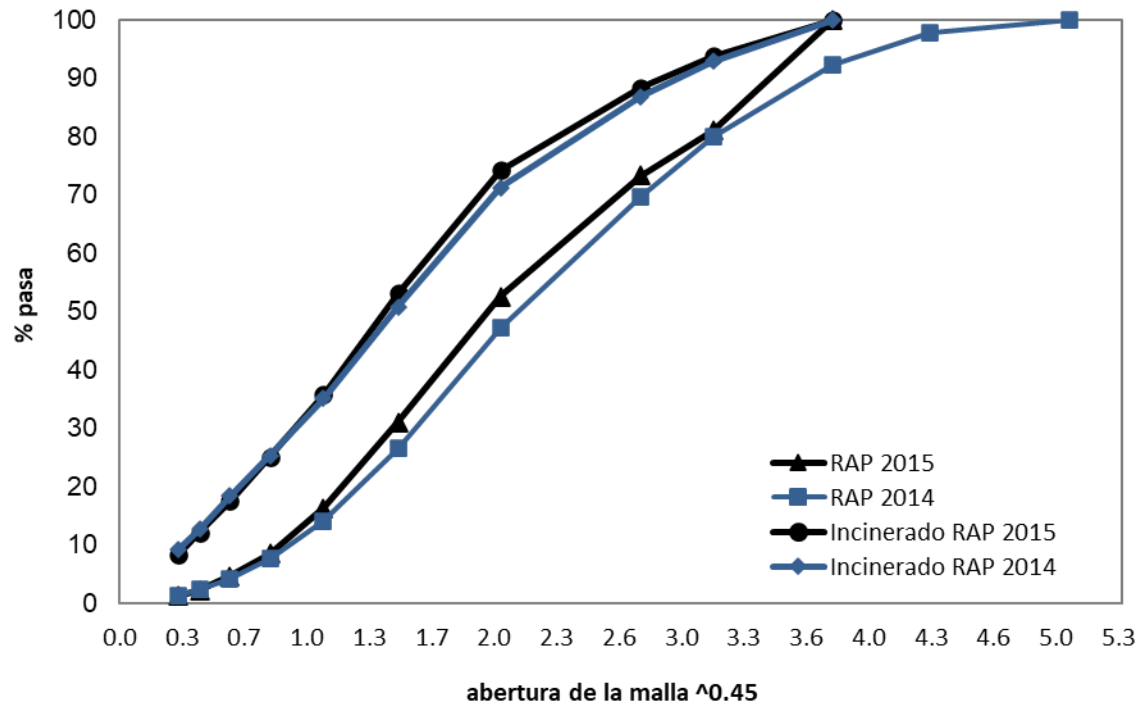
¿Tipo y características de la planta ?

Continua - # de Tolvas o sistema de incorporación

Discontinua - Incorporación en frio o caliente

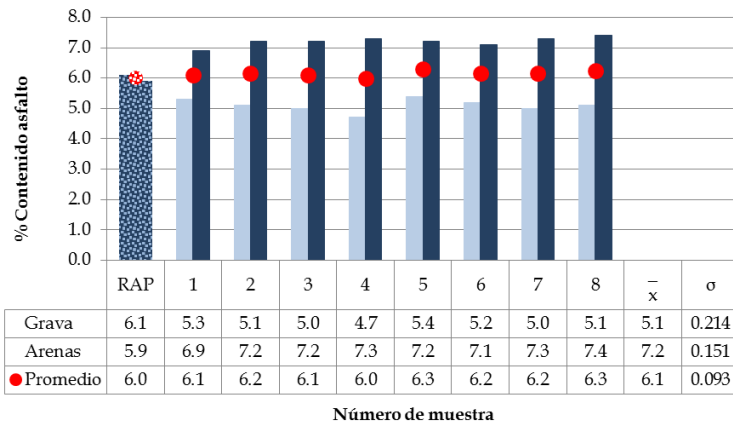


Influencia del tipo de fresado



Consideraciones en el diseño volumétrico

Contenido de asfalto



% Estimado

$$\% CA_{Estimado} = (A * B) + (C * D)$$

Donde:

- A= %RAP
- B= %CARAP
- C= %AGREGADO VIRGEN
- D= %CAADICIONADO

Relación G_{mm} - G_{se} , G_{sb}

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

G_{sb} del pétreo del RAP

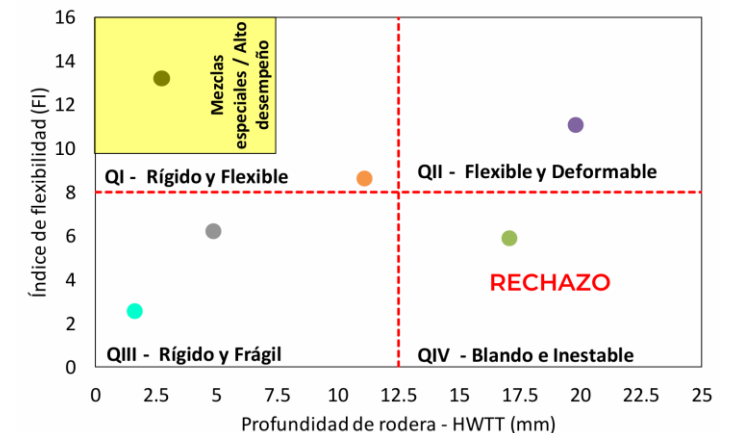
$$G_{sb} = G_{se}$$

$$G_{sb} = \frac{G_{se}}{\left(\frac{P_{ba} G_{se}}{100 G_b} \right) + 1}$$

Propiedades volumétricas

$$\frac{G_{sb}}{G_{se}} = \frac{V_a}{VMA} = \frac{VFA}{VMA}$$

$$P_{ba} = \frac{P_{be}}{R_f} = \frac{P_{be}}{GC a N_{ini}}$$



CONTENIDOS



01

Reciclado de Pavimentos Asfálticos

02

Características de cumplimiento de una mezcla asfáltica

03

Consideraciones en el diseño de mezclas asfálticas con RAP

04

Procedimiento de diseño en función de la concentración de RAP

05

Adecuaciones a requeridas para la implementación en México



Consideraciones para concentración **bajas** de RAP

Concentración $\leq 10\%$

- Utilizar una sola fracción de RAP
- Dominan las características el material de aporte
- No se requiere realizar pruebas al material pétreo del RAP
- No se requiere determinar el PG del asfalto del RAP
- Se determina el contenido de asfalto y la granulometría del RAP
- No se considera el aporte del asfalto del RAP
- Se puede utilizar en cualquier tipo de tránsito.
- Se puede utilizar el diseño volumétrico convencional
- Ensayos de agrietamiento como control
- No se requieren ajustes significativos en la planta



Consideraciones para concentración **intermedias** de RAP

10% > Concentración ≤ 20%

- Se requiere una separación del RAP y control de humedad
- Se requiere conocer características del material al pétreo del RAP
- Se debe determinar el PG del asfalto de RAP
- Se requiere ajustar el PG del asfalto de aporte mediante el uso de aditivos
- Se debe considerar el aporte del asfalto del RAP
- Se puede utilizar en capas intermedias, en tránsitos intermedios o altos
- Se deben definir criterios para evaluar el agrietamiento
- No se puede realizar en una planta convencional
- Se deben ajustar los criterios de control de calidad

Consideraciones para concentración **altas** de RAP

20% > Concentración ≤ 35%

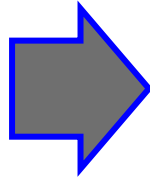
- Una buena gestión del RAP
- Se requiere realizar pruebas al material pétreo del RAP
- Se requiere caracterizar el PG del asfalto del RAP
- Se requiere un procedimiento para el tipo aditivo y concentración
- Se requieren conocer las propiedades mecánicas de agrietamiento
- Se requiere realizar un diseño balanceado de la mezcla asfáltica
- Se puede utilizar en capas intermedias
- Se puede utilizar en tránsitos bajos o intermedios
- Se requieren adecuaciones especiales en la planta
- Se deben ajustar el procedimiento de colocación y compactación en obra



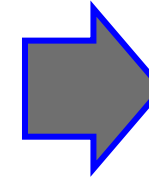
Variabilidad del RAP

RAP $\leq$ 15 % no requiere verificar la variabilidad

Muestreo representativo
(mín. 5 muestras)



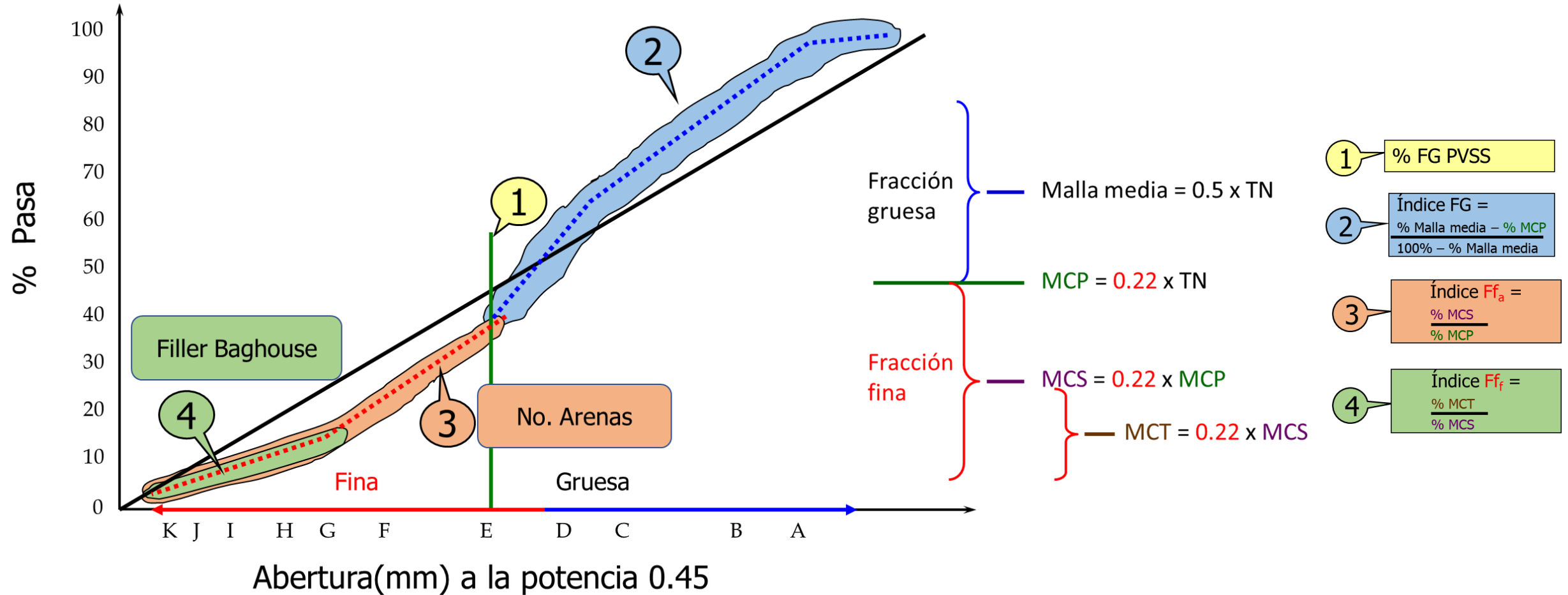
Cálculo de la desviación
estándar (tamices y CA)



Estimación del RAP
máximo permitido en
mezcla

Malla, mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio	Std. Dev.	Máx. de RAP
12.500	98.0	100.0	100.0	99.0	99.0	100.0	100.0	100.0	98.0	98.0	99.2	0.919	100.000
9.500	91.0	98.0	100.0	94.0	97.0	97.0	95.0	93.0	94.0	94.0	95.3	2.669	78.468
4.750	67.0	77.0	75.0	71.0	73.0	78.0	75.0	69.0	70.0	72.0	72.7	3.561	53.067
2.360	53.0	59.0	55.0	54.0	58.0	59.0	57.0	50.0	52.0	53.0	55.0	3.127	50.837
1.180	39.0	44.0	48.0	43.0	49.0	46.0	45.0	41.0	39.0	41.0	43.5	3.536	41.936
0.600	32.0	38.0	37.0	35.0	39.0	36.0	37.0	33.0	32.0	33.0	35.2	2.573	51.237
0.300	22.0	27.0	25.0	23.0	26.0	23.0	25.0	21.0	22.0	22.0	23.6	2.011	72.508
0.150	14.0	17.0	16.0	15.0	16.0	14.0	15.0	14.0	13.0	15.0	14.9	1.197	100.000
0.075	10.7	12.2	11.9	10.7	12.9	10.3	11.9	10.5	9.8	10.8	11.2	0.988	91.954
Contenido de asfalto	4.0	4.5	4.7	4.4	5.1	4.6	4.6	4.3	4.6	4.8	4.6	0.295	42.432

Metodología Bailey (Selección de la granulometría)



Estructura granulométrica de la mezcla asfáltica

Malla	Abertura	Mezcla Referencia	Mezcla 5% RAP	Mezcla 10% RAP
1"	25	100.0	100.0	100.0
3/4"	19	100.0	100.0	100.0
1/2"	12.5	96.7	96.7	96.5
3/8"	9.5	77.9	78.1	77.8
1/4"	6.3	47.0	47.4	46.8
No. 4	4.75	34.4	33.4	34.0
No. 10	2.00	22.9	22.4	23.0
No. 20	0.85	15.1	14.9	15.6
No. 40	0.45	9.7	9.7	10.3
No. 60	0.25	6.8	6.8	7.2
No. 100	0.15	4.3	4.3	4.6
No. 200	0.075	100.0	100.0	100.0

Índice	0% RAP	5% RAP	10% RAP	Límite inferior	Límite superior
FG	0.519	0.552	0.521	0.60	0.75
Ffa	0.439	0.446	0.459	0.35	0.50
Fff	0.45	0.456	0.45	0.35	0.50

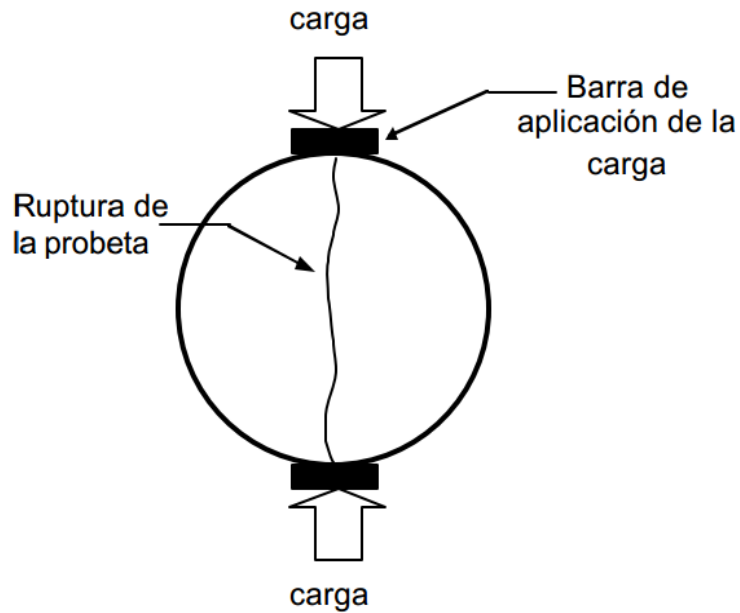
- Ajustar la granulometría en función del volumen
- Ajustar % de fracciones en función del contenido de asfalto

Diseño de mezclas asfálticas con bajas concentraciones

RAP (%)	CA (%) total	CA (%) Aporte	Gmb	Gmm	%Gmm @Nini	Va	VAM	VFA	Pbe	DP
0	6.4	6.4	2.349	2.449	86.54	4.10	16.55	75.20	5.50	0.78
5	6.4	6.1	2.357	2.440	87.10	3.40	16.17	78.96	5.58	0.82
10	5.8	5.2	2.370	2.458	86.80	3.60	15.09	76.14	5.00	0.92
15	5.7	4.7	2.360	2.460	87.10	4.07	15.27	73.38	4.89	0.94

Conforme se aumenta el contenido de RAP, el contenido de asfalto disminuye

Susceptibilidad a la humedad, TSR



Valor de Referencia	5% de RAP	10% de RAP	15% de RAP
87 %	94.4 %	87.8 %	89.0 %

No hay una tendencia del comportamiento en función de la concentración del RAP



Susceptibilidad a la deformación, Hamburgo



Valor de Referencia	5% de RAP	10% de RAP	15% de RAP
2.64	1.94	1.91	2.47

Mínimo de pasadas para la deformación máxima de 10 mm

20 000

No hay una tendencia del comportamiento en función de la concentración del RAP

Energía de fractura

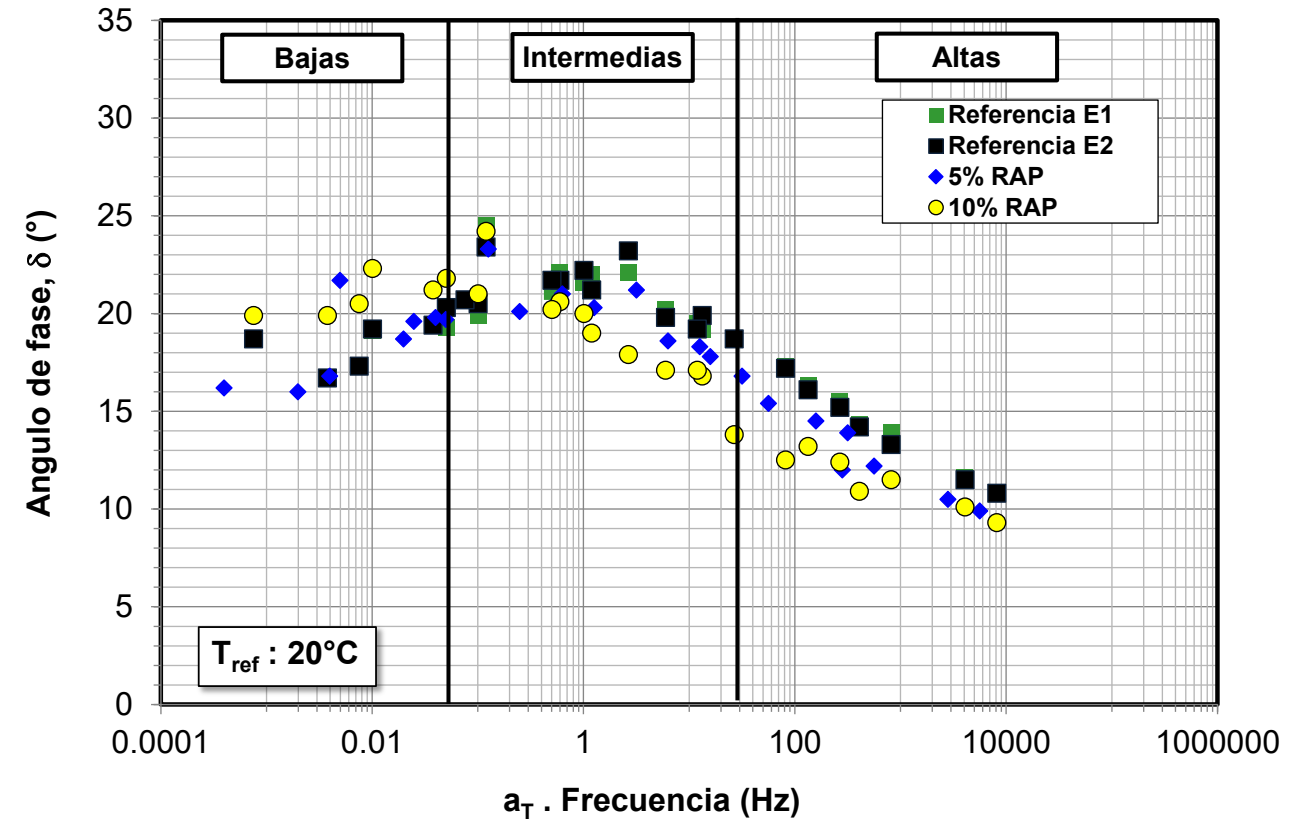
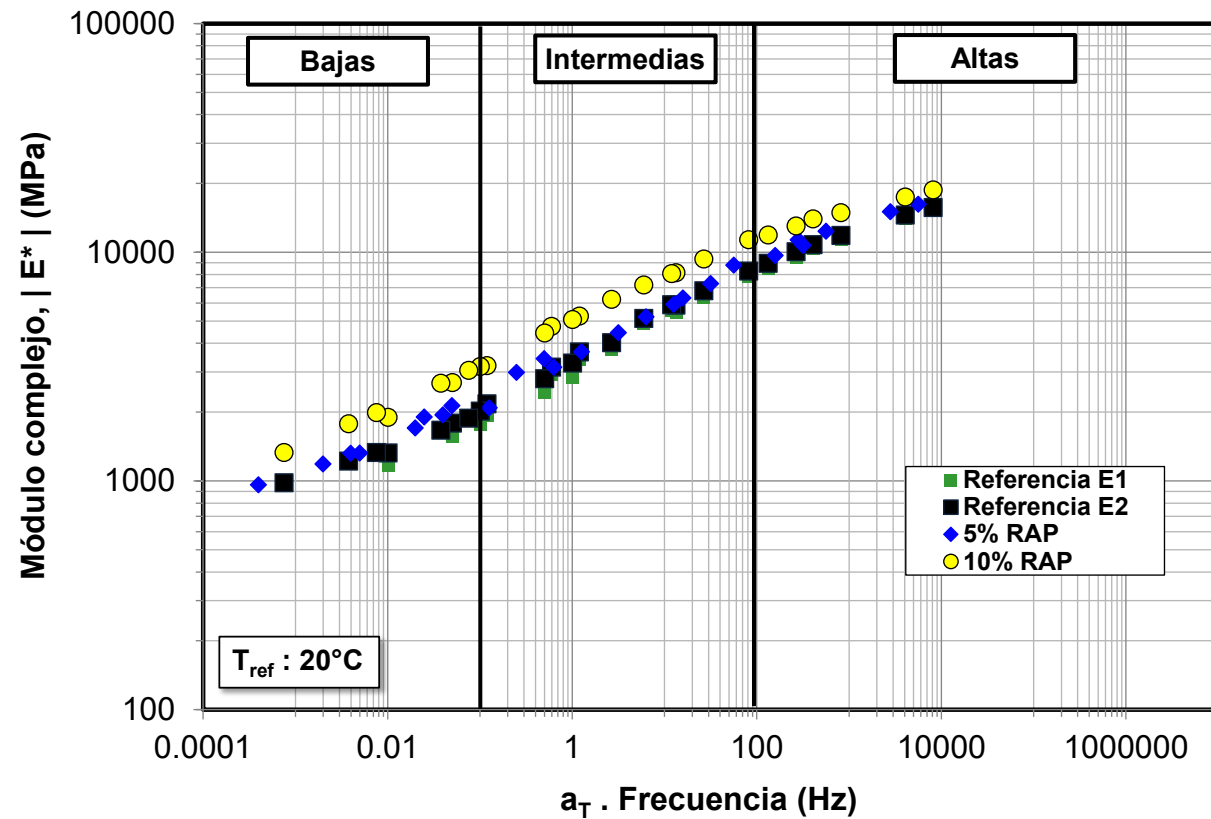
IDEAL-CT

% RAP	δ energía de falla	δ CT Index	δ carga máxima
0%	499.025	11.107	0.013
5%	97.995	20.832	0.886
10%	125.707	11.908	1.225
15% ⁴	183.008	7.822	1.849

DCT

Contenido de RAP	Gf promedio	Gf COV
0%	1011.75	9.30%
5%	740	17.5
10%	664.5	2.7
15%	777.75	6.5

Módulo dinámico



CONTENIDOS



01

Reciclado de Pavimentos Asfálticos

02

Características de cumplimiento de una mezcla asfáltica

03

Consideraciones en el diseño de mezclas asfálticas con RAP

04

Procedimiento de diseño en función de la concentración de RAP

05

Adecuaciones a requeridas para la implementación en México



Normativa de la SICT

Manuales de Mezclas asfálticas



<https://normas.imt.mx/>

Designación	Nombre
M-MMP-4-05-046/21	Método de Diseño por Desempeño para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa
M-MMP-4-05-036/23	Método de Diseño para Mezclas Asfálticas de Granulometría Abierta
M-MMP-4-05-043/23	Método de Diseño para Mezclas Asfálticas de Granulometría Discontinua con Fibra
M-MMP-4-05-056/23	Método de Diseño para Mezclas Asfálticas de Granulometría Discontinua sin Fibra
M-MMP-4-05-034/23	Método Marshall para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa

Normas de Cementos Asfálticos Espumado

Designación	Nombre
N-CSV-CAR-4-02-008/23	Construcción de Bases con Mezcla de Material Pétreo Recuperado y Cemento Asfáltico Espumado
N-CMT-4-04-001/23	Materiales Pétreos Recuperados para Mezclas con Cemento Asfáltico Espumado
N-CMT-4-05-008/23	Mezclas con Material Pétreo Recuperado y Cemento Asfáltico Espumado para Bases

Normativa en desarrollo

Mezclas Asfálticas con material recuperado

N-CMT-4-05-009, *Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa con Material Recuperado en Baja Proporción*

N-CSV-CAR-3-02-017, *Recuperación de Materiales en Pavimentos Asfálticos Existentes*

N- PRY-CAR-5-01-008, Criterios Generales de Diseño Para Mezclas Asfálticas con Materiales Recuperados

Terracerías

M-MMP-1-018, Grado de Compactación con Densímetro Electromagnético

PROYECTO DE PAVIMENTOS (EN COLABORACION CON DGST)

N-PRY-CAR-5-01-002, Criterios Generales para el Análisis y Diseño de Pavimentos Asfálticos

N-PRY-CAR-5-01-003, Análisis y Diseño de Pavimentos Asfálticos

N-PRY-CAR-5-01-004, Características Geométricas del Pavimento Asfáltico

N-PRY-CAR-5-01-005, Diseño de Mezclas para Pavimentos Asfálticos

¡ muchas gracias!

Ponente: Dr. Horacio Delgado Alamilla

Contacto: hdelgado@imt.mx



Comunicaciones

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes

